

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra pružnosti a pevnosti

Návrh snímače krouticího momentu

The Concept of Torque Transducer

Student:

Jakub Vigáš

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. František Fojtík, Ph.D.

Ostrava 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra pružnosti a pevnosti

Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Vigáš**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **3901R003 Aplikovaná mechanika**
Téma: **Návrh snímače krouticího momentu**
The Concept of Torque Transducer

Zásady pro vypracování:

1. Navrhněte snímač krouticího momentu. Zadaný krouticí moment je 20 kNm.
2. Navrhněte způsob uchycení snímače.
3. Proveďte napěťově deformační analýzu snímače.
4. Navrhněte měřicí obvod a zvolte vhodnou měřicí aparaturu.
5. Zpracujte technickou dokumentaci snímače.

Seznam doporučené odborné literatury:

MACURA, P. Experimentální metody v pružnosti a plasticitě. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2006.
MACURA, P. Sbírka úloh z experimentální pružnosti. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008.
DEJL, Z. Konstrukce strojů a zařízení I., Spojovací části strojů, návrh, výpočet, konstrukce, Ostrava: MONTANEX a.s., 2000.
LENERT, J. Úvod do metody konečných prvků. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1999.
ANSYS INC. Documentation for ANSYS Release 11.0. SAS IP, Inc., 2007.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. František Fojtík, Ph.D.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



prof. Ing. Jan Fuxa, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :

.....

podpis

VIGÁŠ Jakub

Jiřího Herolda 1557/12 Ostrava Bělský les

Anotace bakalářské práce

VIGÁŠ,J. *Návrh snímače krouticího momentu: Bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra pružnosti a pevnosti, 2010, 38s. Vedoucí práce: Fojtík,F.

Bakalářská práce se zabývá návrhem snímače krouticího momentu. V úvodu jsou uvedeny současné trendy ve výrobě snímačů. Z těchto trendů pak je vybrán snímač s odporovými tenzometry. Snímač je navrhnout ze známé deformace. Další část se zabývá uchycením snímače. Pevnostní výpočet snímače je proveden pomocí vzorců. Tyto výpočty jsou následně ověřeny metodou konečných prvků pomocí programu ANSYS. Tímto programem jsou také zpřesněny další rozměry snímače. Nakonec je navrhována měřicí aparatura s zapojením tenzometrů. Práce obsahuje výrobní výkres a výkres sestavení.

Annotation of Bachelor Thesis

VIGÁŠ,J. *The Concept of Torque Transducer: Bachelor Thesis.* Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics of materials, 2010, 38s. Supervisor: Fojtik,F.

The bachelor thesis deals with the concept of torque transducer. In the introduction are given current trends in production of the sensors. From these trends is then selected sensor with resistive strain gauges. The sensor is designed from a known strain. Another section deals with the attachment of the sensor. Strength calculation of the sensor is performed by using formulas. These calculations are verified by finite element method using software ANSYS. This software is also further specified dimensions of the sensor. Finally is designed the measuring apparatus with the wiring of strain gauges. Work includes manufacturing drawing and assembly drawing.

OBSAH

POUŽITÉ ZNAČENÍ	2
ZKRATKY	2
1 Úvod.....	3
2 Návrh snímače krouticího momentu.....	6
2.1 Materiál pro výrobu snímače	7
2.2 Výpočet zúženého průměru snímače	7
2.3 Výpočet šroubů pro uchycení snímače	10
2.3.1 Výpočet přítláčné síly	11
2.3.2 Výpočet utahovacího momentu šroubů	12
2.3.3 Pevnostní kontrola šroubů	15
2.4 Rozměry snímače krouticího momentu	16
2.5 Kryt měřicí části.....	17
3 Napětově-deformační analýza snímače.....	18
3.1 Tvorba modelu – upřesnění zaoblených přechodů	18
3.2 Příprava modelu v programu ANSYS	20
3.2.1 Výběr elementu a materiálu modelu	20
3.2.2 Rozdělení modelu na samostatné objemy	21
3.3 Sítování modelu.....	21
3.4 Výpočet modelu v programu ANSYS	23
3.4.1 Okrajové podmínky	23
3.4.2 Výpočet zatíženého modelu	25
4 Schéma zapojení a návrh měřicí aparatury	30
4.1 Použité tenzometry	30
4.1.1 Princip měření odporovými tenzometry	31
4.2 Měřicí aparatura	33
5 Závěr	36
Seznam použité literatury	37
Seznam příloh	38

POUŽITÉ ZNAČENÍ

Značka	Význam	Jednotka
$\varnothing D$	Vnější průměr měřicí části snímače	[mm]
$\varnothing D_F$	Průměr působíště třecí síly, Roztečný průměr	[mm]
$\varnothing D_d$	Průměr díry pro šroub	[mm]
$\varnothing D_k$	Průměr hlavy šroubu	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
F_1, F_O	Osová síla v jednom šroubu	[N]
F_T	Třecí síla mezi přírubami	[N]
F_Z	Třecí síla na závitu	[N]
G	Modul pružnosti ve smyku	[MPa]
M_k	Krouticí moment	[Nm]
M_{tm}	Třecí moment pod hlavou šroubu	[Nm]
M_{tz}	Třecí moment na závitech	[Nm]
M_u	Utahovací moment	[Nm]
N	Normálová síla	[N]
P	Rozteč závitu	[mm]
R	Elektrický odpor	[Ω]
R_1, R_2	Poloměry přechodů	[mm]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
S	Plocha průřezu šroubu	[mm ²]
W_k	Modul průřezu v krutu	[mm ³]
$\varnothing d$	Vnitřní průměr měřicí části snímače	[mm]
$\varnothing d_2$	Střední průměr závitu	[mm]
$\varnothing d_3$	Malý průměr závitu	[mm]
f	Součinitel tření	[-]
f_z	Součinitel tření na závitech	[-]
k	Součinitel bezpečnosti, Deformační součinitel	[-]
k_s	Součinitel bezpečnosti šroubů	[-]
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	Poměrná deformace	[-]
μ	Poissonova konstanta	[-]
$\sigma_{1,2}$	Hlavní napětí	[MPa]
σ_{red}	Redukované napětí	[MPa]
σ_t	Tahové napětí	[MPa]
τ	Smykové napětí	[MPa]
τ_k	Napětí v krutu	[MPa]
φ'	Redukovaný třecí úhel	[°]
ψ	Úhel stoupání závitu	[°]

ZKRATKY

PC (Personal Computer) – osobní počítač

1 Úvod

Snímače krouticího momentu jsou založeny na deformaci hřídele, která je snímána převážně elektrickými odporovými tenzometry. Tyto tenzometry mohou být uhlíkové, polovodičové nebo kovové. Kovové tenzometry se vyrábějí buď jako drátkové nebo jako fóliové. Nejvíce používané tenzometry jsou ve formě kovové fólie, která se lepí na měřicí místo snímače. Tenzometry se zapojují do tzv. Wheatstonova můstku, který bude popsán v jedné z následujících kapitol. Vlivem deformací hřídele se deformuje také tenzometr přilepený na něm a v závislosti na této deformaci se mění jeho odpor. Tato změna odporu se přepočítá na změnu deformace, která se převede na požadovanou veličinu (krouticí moment). Tato veličina je pak zobrazena pomocí vhodné aparatury. Příklad aparatury pro tenzometry je na obrázku níže (obr.1.1).



Obr.1.1 – Aparatura OMEGA DP41-W

V současné době jsou snímače krouticího momentu vyráběny především s kovovými fóliovými tenzometry, ale na trhu s touto technikou jsou nabízeny také snímače, které jsou založeny na deformaci piezoelektrického prvku (křemíkový krystal). Tento piezoelektrický snímač vlivem deformace vytváří elektrický náboj, který je dále zesílen a převeden na napětí, které lze měřit a vyhodnocovat tak výsledky. Jedním z takových snímačů je např. snímač firmy KISTLER (obr.1.2).



Obr.1.2 – Piezoelektrický snímač

Snímače krouticího momentu se vyrábějí v zásadě ve dvou základních provedeních a to:

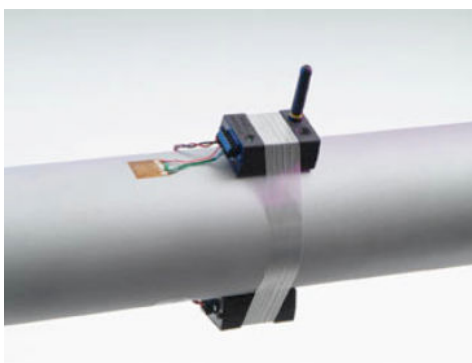
- nerotační
- rotační

Snímače nerotační se používají především u momentových klíčů a u zařízení pro jejich seřizování.

Rotační snímače se využívají jak u momentových klíčů, tak pro měření na hřídelích různých strojů, přičemž navíc umožňují měřit i další hodnoty jako například otáčky hřídele apod. U těchto rotačních snímačů je výstupní signál přenášen buď kontaktem, kdy jsou na hřídeli nalepeny sběrné kroužky, anebo bezkontaktně. Bezkontaktní přenos je realizován buď indukčně, nebo pomocí vysílací aparatury založené na infračerveném rozhraní. Obě tyto varianty jsou uvedeny na obrázcích níže (obr.1.3 a 1.4).



Obr.1.3 – Indukční snímače



Obr.1.4 – Snímač s infračerveným rozhraním

Mnoho snímačů krouticího momentu umožňuje navíc měřit kombinované namáhání jako například krut+tah/tlak.

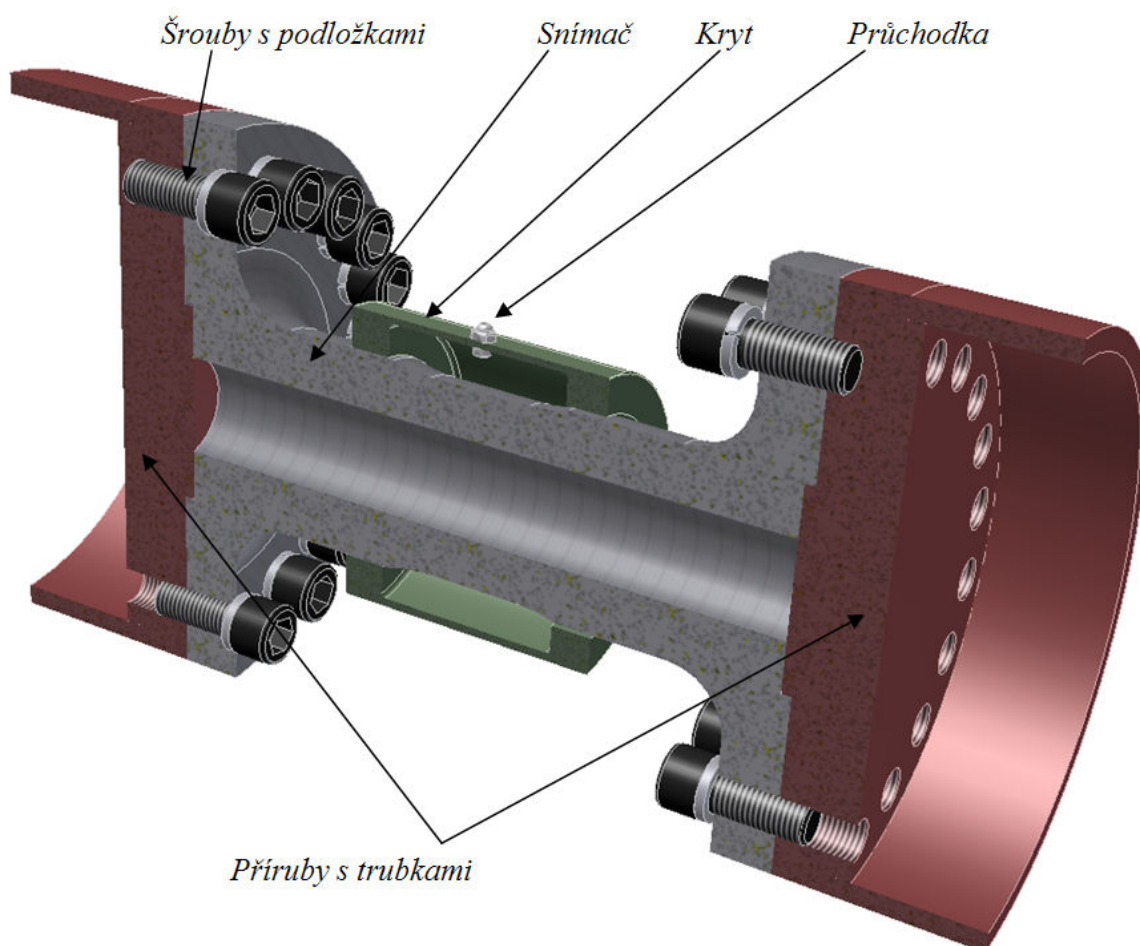
Příkladem nerotačního snímače krouticího momentu s odporovými tenzometry je snímač od firmy HBM typ TB2 (obr.1.5). Jedná se o snímač s upevněním pomocí příruby. Tento snímač se vyrábí pro několik rozsahů měření. Ten nejmenší měří krouticí moment do 500Nm, ten největší pak do 10000Nm. Nachází se v třídě přesnosti 0,03%. Citlivost snímače je 1mV/V ($\pm 0,1\%$). Odchylka od linearity zahrnující také hysterezi je udávána méně než $\pm 0,03\%$. Rozsah pracovní teploty, při které je snímač možno použít je od -10 do 80°C. Hmotnost tohoto typu je 14,8kg.



Obr.1.5 – Snímač od firmy HBM typ TB2

2 Návrh snímače krouticího momentu

Navrhovaný snímač bude pouze pro snímání krouticího momentu. Důležité je navrhnout průměr snímače, na kterém bude prováděno měření pomocí tenzometrů. Další část návrhu se týká uchycení snímače s patřičnými výpočty. Navrhovaný snímač bude pro kontrolu utahovacího momentu při utahování matic na potrubí s přírubami o průměru $\varnothing 280\text{mm}$. Dále je zapotřebí určit další rozměry snímače jako je tloušťka přírub, velikost vodícího průměru na přírubách pro správné umístění snímače v ose nebo délka měřicí části. Tenzometry použité na tomto snímači budou odporové fóliové a budou zapojeny do tzv. Wheatstonova můstku. Všechny potřebné rozměry snímače jsou pak uvedeny na výrobním výkrese (viz příloha SB3APM02-VIG001-01). V poslední řadě se pak bude na měřicí část s tenzometry upevňovat kryt s průchodkou pro vodiče od tenzometrů. Celý koncepční návrh snímače s upevněním a popisem je na obrázku níže (obr.2.1).



Obr.2.1 – Snímač krouticího momentu

2.1 Materiál pro výrobu snímače

Snímač bude vyroben z chrom-křemíkové oceli třídy 14 260.8. Jedná se o ocel na pružiny jejíž chemické složení je uvedeno v tabulce (tab.2.1). Polotovár, ze kterého se bude snímač vyrábět, bude z tyče tažené za studena.

Základní údaje o oceli 14 260.8 (vše podle [1]):

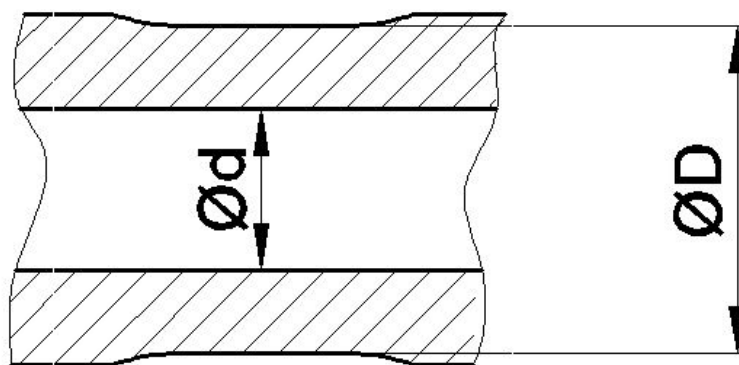
- modul pružnosti v tahu $E=200000\text{MPa}$
- modul pružnosti ve smyku $G=78500\text{MPa}$
- mez kluzu $R_e=1275\text{MPa}$ (pro případ oceli 14 260.8, což je pro materiál zušlechtěný na horní pevnost)
- tvrdost HB (dle Brinella) $435\div 507$
- Poissonova konstanta $\mu=0.3$ [-]

Tab.2.1 – Chemické složení oceli 14 260.8 v % hmotnosti

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0,5-0,6	0,5-0,8	1,3-1,6	0,5-0,7	max 0,5	max 0,3	max 0,035	max 0,035

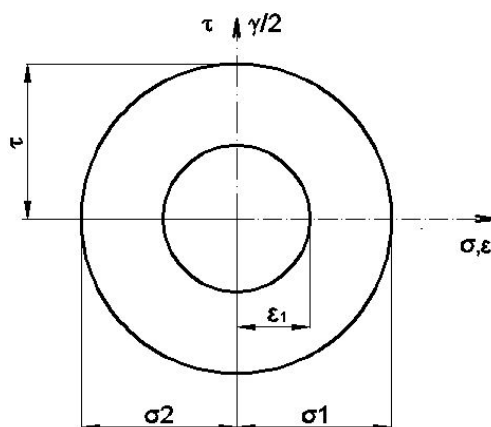
2.2 Výpočet zúženého průměru snímače

Nejprve je nutné vypočítat průměry ($\varnothing D$, $\varnothing d$) v zúžené části snímače (obr.2.2). Důležitý je hlavně průměr $\varnothing D$, na který se lepí tenzometry. Tento průměr vypočteme z deformace v tomto místě. Jestliže citlivost snímače volíme $1,5\text{mV/V}$, tak při této citlivosti je měřicí rozsah snímače $3000\mu\text{S}$ ($1\mu\text{S}=1\mu\text{m/m}$). Tenzometry budou zapojeny do celého Wheatstonova můstku, což znamená, že deformace při tomto zapojení bude čtyřnásobek naměřené hodnoty. Na jednom tenzometru bude tedy maximální naměřená deformace ε_1 rovna $\frac{1}{4}$ celého rozsahu, což je $750\mu\text{S}$. Tato hodnota je použita pro následný výpočet průřezového modulu mezikruhového průřezu. Z dostupného vzorce (2.6) [2] pro tento modul byl následně vypočítán vnější průměr $\varnothing D$, přičemž vnitřní průměr $\varnothing d$ mezikruží byl zvolen a pro výpočet vnějšího průměru $\varnothing D$ bylo použito jednoduché iterační metody s pomocí programu MS Excel.



Obr.2.2 – Zúžená část snímače

Vzorec pro obecný Hookeův zákon (2.1) [3] můžeme upravit na tvar se smykovými napětími (2.2), kde τ je rovno hlavním napětím σ_1 , σ_2 a E je modul pružnosti, jehož hodnota je pro každý materiál jiná. Hodnota pro použitý materiál na výrobu snímače je uvedena v předešlé kapitole. Vztahy mezi normálovými a smykovými napětími pro dvojsový stav napjatosti vyplývají z Mohrovy kružnice (obr.2.3).



Obr.2.3– Mohrova kružnice pro krut

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \mu\sigma_2) \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\tau + \mu\tau) \quad (2.2)$$

Z rovnice (2.2) pak následně můžeme vyjádřit smykové napětí τ a dostaneme tak rovnici (2.3) obsahující deformaci ε_1 . Za deformaci ε_1 je dosazena hodnota $750\mu\text{S}$, kterou převedeme z μS (mikrostrain) na m/m. Poměrná deformace potom bude $\varepsilon_1=750 \times 10^{-6}$.

Rovnici (2.3) pak dosadíme do vzorce (2.4) pro výpočet smykového napětí pro kroucení.

$$\tau = \frac{E \cdot \varepsilon_1}{1 + \mu} \quad (2.3)$$

$$\tau = \frac{M_k}{W_k} \quad (2.4)$$

Z rovnice (2.4) pak po dosazení vyjádříme vztah pro průřezový modul v krutu W_k (2.5). Po dosazení známých hodnot do tohoto vztahu dostaneme požadovanou hodnotu průřezového modulu v krutu.

$$W_k = \frac{(1 + \mu) \cdot M_k}{E \cdot \varepsilon_1} \quad (2.5)$$

$$W_k = \frac{(1 + \mu) \cdot M_k}{E \cdot \varepsilon_1} = \frac{(1 + 0,3) \cdot 20 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^{11} \cdot 750 \cdot 10^{-6}} = 1,733 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3$$

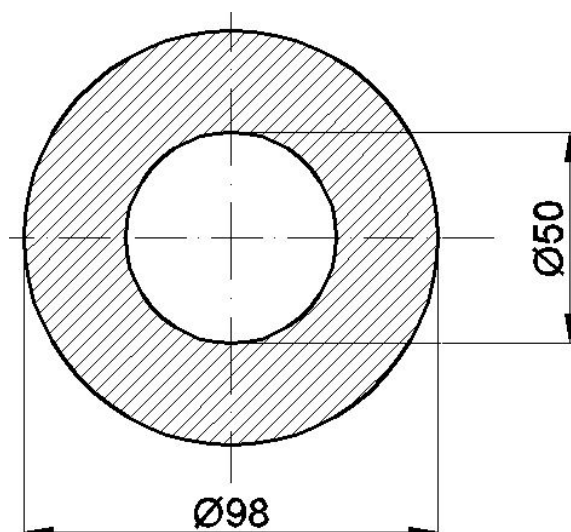
Tuto hodnotu následně použijeme při výpočtu velkého průměru mezikruží. K výpočtu bylo použito jednoduché iterační metody za pomoci programu MS Excel. Tato metoda je založena na tom, že malý průměr byl zvolen ($\varnothing d = 50 \text{ mm}$), následně byly vytabelovány hodnoty velkého průměru $\varnothing D$ s krokem $0,01 \text{ mm}$ a nakonec odečtena nejbližší odpovídající hodnota průřezového modulu v krutu W_k vypočtena pomocí vzorce (2.5). Pro výpočet vnějšího průměru byl použit vzorec modulu mezikruhového průřezu (2.6) [2]. Několik hodnot tohoto řešení zobrazuje tabulka níže (tab.2.2). Zvýrazněná hodnota je hledaný průměr.

$$W_k = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{16 \cdot D} \quad (2.6)$$

Tab.2.2 – Tabelace vnějšího průměru zúženého průřezu

$\varnothing d$	$\varnothing D [\text{mm}]$	$W_k [\text{mm}^3]$
50	98,15	173149,19
50	98,16	173207,22
50	98,17	173265,26
50	98,18	173323,30
50	98,19	173381,36
50	98,20	173439,43

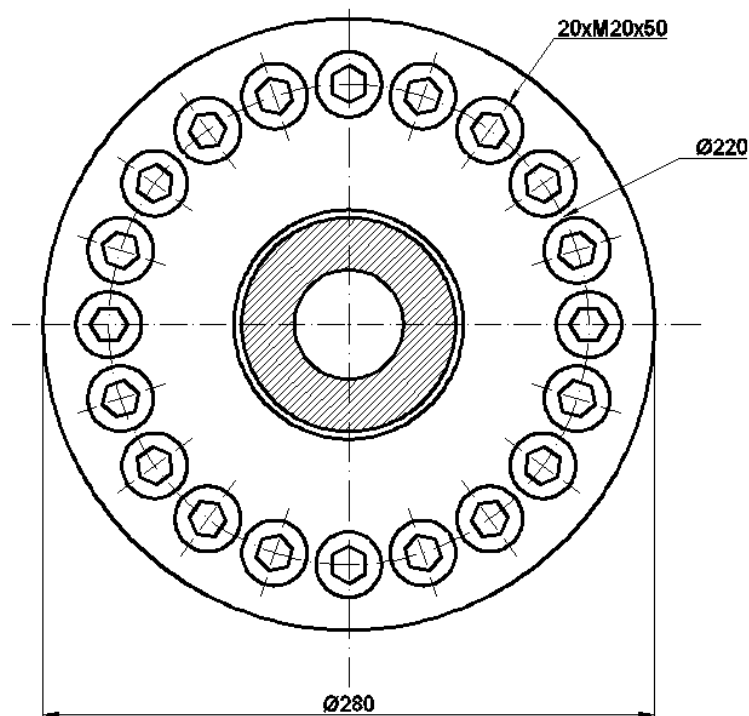
Vnější průměr $\varnothing D$ je z výrobních důvodů zaokrouhlen a jeho hodnota je tedy $\varnothing D=98\text{mm}$. Vnitřní průměr byl ponechán beze změny. Průřez měřicí části snímače s vypočtenými rozměry je zobrazen níže (obr.2.4).



Obr.2.4 – Rozměry měřicí části snímače

2.3 Výpočet šroubů pro uchycení snímače

Pro přenos požadovaného maximálního krouticího momentu M_k je nutno vyvodit dostatečně velkou přítláčnou sílu na přírubách, aby nedošlo k prokluzu. Přítláčná síla je vyvozena utažením šroubů. Tato síla byla vypočtena ze vztahu pro výpočet třecí síly. Výchozím bodem v tomto případě je krouticí moment a tudíž síla na určitém rameni. Toto rameno bylo voleno v závislosti na počtu a velikosti šroubů tak, aby se vešly na požadovanou velikost příruby (obr.2.5). Jako upevňovací šrouby jsou použity šrouby M20x50 ČSN EN ISO 4762–12.9 s mezí kluzu $R_e=1080\text{MPa}$ [2]. Jedná se o vysokopevnostní šrouby s vnitřním šestihranem. Pod tyto šrouby přijdou ještě pružné podložky ČSN 02 1740, které zamezí šroubům v jejich samovolnému povolání.



Obr.2.5 – Rozložení šroubů na přírubě

Z důvodu menších osových sil ve šroubech a tím i menších utahovacích momentů byl zvolen počet 20 kusů těchto šroubů rozmístěných na roztečném průměru $\varnothing D_F = 220\text{mm}$ jak je zobrazeno na obr.2.5.

2.3.1 Výpočet přítláčné síly

Aby byl snímač schopen přenést požadovaný krouticí moment, je nutné vypočítat přítláčnou sílu. Tuto sílu vyvozuje 20 šroubů velikosti M20 utažených příslušným utahovacím momentem, který bude vypočítán v následující podkapitole.

Nejprve vypočteme třecí sílu F_T . Tento výpočet vychází z toho, že síla třecí F_T musí být větší než síla vyvozující krouticí moment M_k . Výpočet je proveden pomocí jednoduchého vzorce (2.7). Do něj je dosazena hodnota krouticího momentu a velikost ramene, na kterém působí síla vyvozující tento moment. Rameno, na kterém tato síla působí je $D_F/2 = 110\text{mm}$. Tato síla je ještě kvůli bezpečnosti zvýšena o 20%.

$$F \leq F_T \geq \frac{M_k}{\frac{D_F}{2}} \quad (2.7)$$

$$F_T \geq \frac{M_k}{\frac{D_F}{2}} = \frac{20000}{\frac{0,22}{2}} = 181818,182\text{N}$$

Výpočet zvýšení třecí síly o 20% z důvodu bezpečnosti ($k=1,2$).

$$F_T = F_T \cdot k_1 = 181818,182 \cdot 1,2 = 218181,818N$$

Z podmínky pro tření pak je vypočtena síla normálová N (2.8). Koeficient tření f mezi přírubami byl zvolen $f=0,2$ (ocel x ocel).

$$N = \frac{F_T}{f} \quad (2.8)$$

$$N = \frac{F_T}{f} = \frac{218181,818}{0,2} = 1090909,091N \quad (2.9)$$

Síla připadající na jeden šroub pak tedy bude celková normálová síla N podělena počtem šroubů (2.10).

$$F_1 = F_0 = \frac{N}{20} = \frac{1090909,091}{20} = 54545,454N \quad (2.10)$$

2.3.2 Výpočet utahovacího momentu šroubů

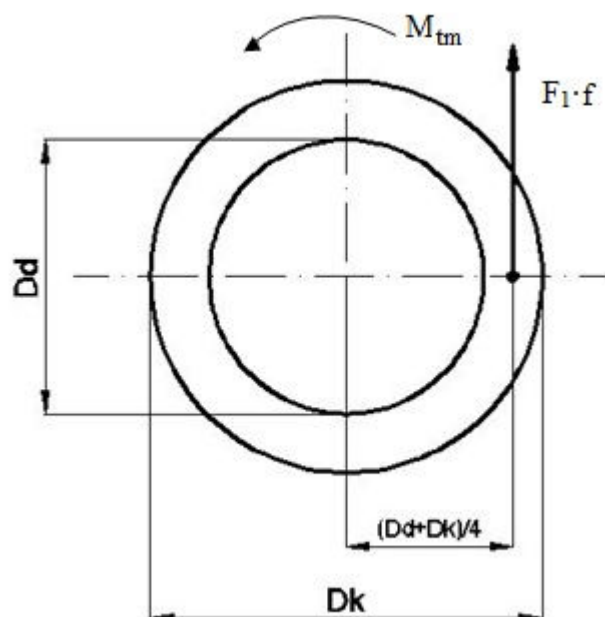
Pro dosažení potřebné přitlačné síly je nutné všechny šrouby utáhnout patřičným utahovacím momentem. Tento moment je složen ze dvou samostatných momentů [4]. Pro výpočet těchto momentů a následné pevnostní výpočty je nutné znát rozměry šroubu a jiné hodnoty. Jedná se o malý průměr závitu d_3 , střední průměr závitu d_2 , průměr hlav šroubu D_k , průměr díry pro šroub D_d a součinitelé tření f a f_z . Součinitel f je pro tření pod hlavou šroubu a součinitel f_z je pro tření v závitech. Všechny tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce níže (tab.2.3).

Tab.2.3 - Rozměry šroubu M20 a hodnoty pro výpočet utahovacího momentu

	d_3	d_2	D_k	D_d	f	f_z
M20	$d_3=18,773\text{mm}$	$19,350\text{mm}$	30mm	21mm	$0,2$	$0,19$

První z těchto dvou momentů je moment od třecí síly pod hlavou šroubu (popř. maticí) M_{tm} . Tento moment je vypočten pomocí vztahu (2.11), kde součin normálové síly F_1 a součinitele tření f pod hlavou šroubu nám dá třecí sílu, která působí na rameni určeném tvarem hlavy šroubu a velikostí díry, jak je vidět na obrázku (obr.2.6).

$$M_{tm} = F_1 \cdot f \cdot \frac{D_k + D_d}{4} \quad (2.11)$$



Obr.2.6 – Působíště třecí síly pod hlavou šroubu a rameno momentu M_{tm}

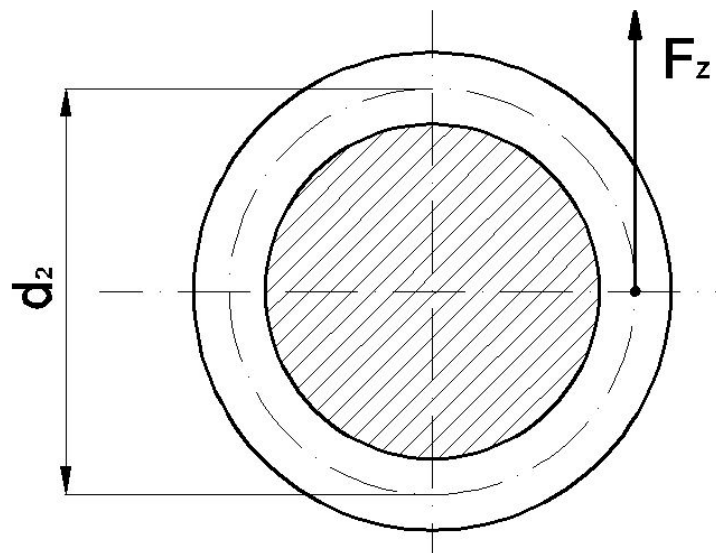
Po dosazení příslušných hodnot do vztahu (2.11) dostaneme velikost třecího momentu pod hlavou šroubu.

$$M_{tm} = 54545,454 \cdot 0,2 \cdot \frac{30 \cdot 10^{-3} + 21 \cdot 10^{-3}}{4} = 139,091 Nm$$

Druhý z momentů je moment M_{tz} od třecí síly na závitech F_z . Tato síla má rameno na středním poloměru závitu d_2 jak je vidět na obrázku (obr.2.7). Součinitel tření v závitech byl stanoven pro závit bez povrchové úpravy a bez mazání. Několik příkladů tření na závitech podle [5] je uvedeno v tabulce níže (tab.2.4). Vybrána pak byla hodnota ze zvýrazněného řádku.

Tab.2.4 – Příklady součinitele tření

f_z	povrchová úprava šroubu	mazání závitů
0,19÷0,36	žádná	ne
0,16÷0,24		olejem
0,12÷0,18		MoS ₂
0,28÷0,40	fosfátovaný	ne
0,17÷0,30		olejem
0,13÷0,17		MoS ₂



Obr.2.7 – Působíště třecí síly v závitech

Pro výpočet momentu od třecí síly v závitech F_z je nutno nejprve vypočíst tuto sílu. Síla se vypočte pomocí vzorce (2.12), který je odvozen ze silových poměrů na závitu. V tomto vzorci figurují dva úhly. Jedním z nich je úhel stoupání závitu ψ , který se vypočte ze vzorce (2.13), kde P je rozteč závitů a pro použitý šroub je hodnota $P=2,5\text{mm}$. Další z úhlů je redukovaný třecí úhel φ' . Hodnotu tohoto úhlu získáme dosazením do vzorce (2.14), kde f_z je již známé tření v závitu (tab. 2.2).

$$F_z = F_o \cdot \operatorname{tg}(\psi + \varphi') \quad (2.12)$$

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{P}{\pi \cdot d_2} \quad (2.13)$$

$$\varphi' = \operatorname{arctg} \frac{f_z}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}} \quad (2.14)$$

Po dosazení do předchozích rovnic dostaneme hodnoty úhlů a nakonec hodnotu třecí síly v závitech.

$$\varphi' = \operatorname{arctg} \frac{0,19}{\cos 30^\circ} = 12,374^\circ$$

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{2,500}{\pi \cdot 19,350} = 2,355^\circ$$

$$F_z = 54545,454 \cdot \operatorname{tg}(2,355 + 12,374) = 14339,244\text{N}$$

Výsledný moment od třecí síly v závitech F_z dostaneme dosazením do vzorce (2.15). Celkový utahovací moment šroubu M_u pak získáme součtem dvou předchozích momentů (2.16).

$$M_{tz} = F_z \cdot \frac{d_2}{2} \quad (2.15)$$

$$M_{tz} = 14339,244 \cdot \frac{19,350 \cdot 10^{-3}}{2} = 138,732 Nm$$

$$M_u = M_{tm} + M_{tz} \quad (2.16)$$

$$M_u = 139,091 + 138,732 = 277,823 Nm$$

Všechny zmíněné vzorce pro výpočet šroubů jsou z dostupné literatury [5].

2.3.3 Pevnostní kontrola šroubů

Kontrola vychází z Hookeova zákona pro tah. Dále jsou šrouby namáhány krutem od síly v závitech F_z . Šrouby třídy pevnosti 12.9 mají mez kluzu $Re=1080MPa$, což je hodnota dosti vysoká, ale spoj tak bude mít větší bezpečnost proti porušení. Tyto dvě namáhání jsou pak následně použita pro výpočet redukovaného napětí. Redukované napětí σ_{red} bylo vypočteno pomocí Guestovy pevnostní hypotézy (2.21) (tato hypotéza bere v potaz maximální smykové napětí, při kterém dojde k poruše) a následně z něj bezpečnost k_s .

Nejprve vypočteme tahové napětí σ_t při namáhání šroubu tahem. Do vzorce (2.17) se pro výpočet plochy S dosadí malý průměr závitu d_3 (2.18).

$$\sigma_t = \frac{F}{S} \quad (2.17)$$

$$\sigma_t = \frac{F_0}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} \quad (2.18)$$

Po dosazení do vzorce (2.18) dostaneme výsledné tahové napětí σ_t .

$$\sigma_t = \frac{F_0}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} = \frac{54545,454}{\frac{\pi \cdot 18,773^2}{4}} = 197,061 MPa$$

Dále vypočteme napětí smykové τ_k , které vznikne od krouticího momentu M_{tz} způsobeného silou F_z . Do vzorce pro výpočet tohoto napětí (2.19) je potřeba ještě vypočítat průřezový modul v krutu W_k (2.20). Do tohoto průřezového modulu se dosadí nejslabší místo na šroubu, a to malý průměr závitu d_3 .

$$\tau_k = \frac{M_{tz}}{W_k} \quad (2.19)$$

$$W_k = \frac{\pi \cdot d_3^3}{16} \quad (2.20)$$

$$W_k = \frac{\pi \cdot 18,773^3}{16} = 1299,065 \text{ mm}^3$$

$$\tau_k = \frac{M_{tz}}{W_k} = \frac{138,732 \cdot 10^3}{1299,065} = 106,794 \text{ MPa}$$

Následuje výpočet redukovaného napětí podle Guestovy hypotézy a z něj bezpečnost šroubu k_s z příslušného vzorce (2.22).

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_t^2 + 4 \cdot \tau_k^2} \quad (2.21)$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{197,061^2 + 4 \cdot 106,794^2} = 290,608 \text{ MPa}$$

$$k_s = \frac{R_e}{\sigma_{red}} \quad (2.22)$$

$$k_s = \frac{1080}{290,608} = 3,716 [-]$$

Bezpečnost šroubu k_s je 3,716 což je dostačující.

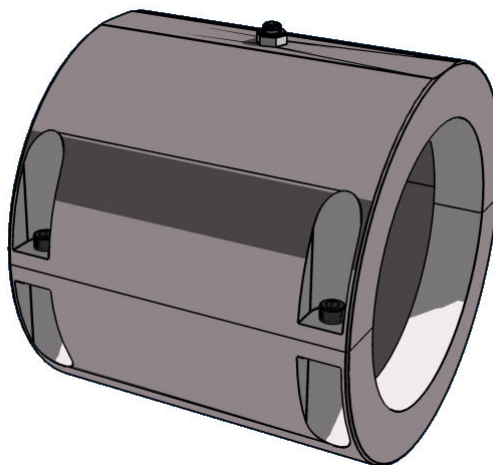
2.4 Rozměry snímače krouticího momentu

Nyní je znám počet šroubů a průměr, na kterém budou rozmístěny. Maximální průměr upínacích přírub byl zadán a jeho hodnota je $\varnothing D=280\text{mm}$. Všechny ostatní rozměry jsou voleny v závislosti na velikosti a použití snímače tak, aby šel snímač snadno namontovat. Všechny výrobní rozměry jsou uvedeny ve výkresové dokumentaci na výrobním výkrese snímače SB3APM02-VIG001-01 (viz příloha).

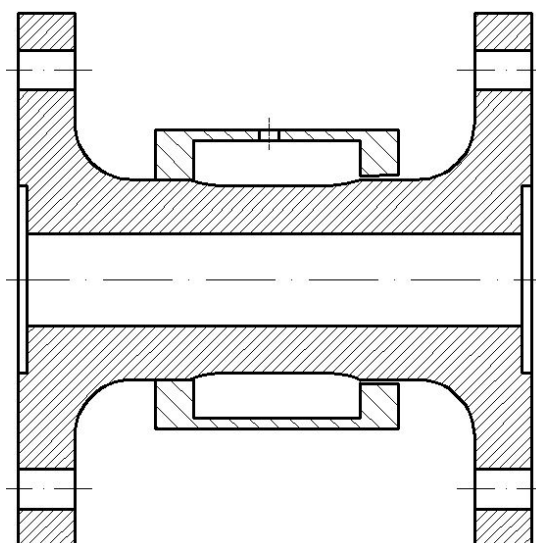
Výkresová dokumentace (viz příloha) obsahuje také výkres sestavy (SB3APM02-VIG001-02) obsahující jednotlivé součásti pro připojení snímače.

2.5 Kryt měřicí části

Kolem měřicí části snímače je vhodné umístit kryt, který by zabraňoval poškození tenzometrů a vodičů k nim připojených. Tento kryt bude vyroben ze dvou polovin spojených k sobě čtyřmi šrouby M5x10 (obr.2.8). Kryt bude vyroben z trubkového polotovaru, který se následně opracuje. Materiál krytu bude slitina hliníku. V jedné z polovin bude navíc průchodka pro vodiče k tenzometrům. Rozměry tohoto krytu jsou voleny v závislosti na velikosti místa s nalepenými tenzometry. Jedna strana krytu je utažena těsně kolem snímače, zatímco druhá se snímače nedotýká. Poloha krytu na snímači je uvedena níže (obr.2.9).



Obr.2.8 – Kryt snímače s průchodkou



Obr.2.9 – Umístění krytu na snímači

3 Napět'ově-deformační analýza snímače

Model snímače byl propočítán pomocí dostupných analytických vzorců (3.1). Jedná se hlavně o smykové napětí na měřicí části snímače (zúžená část viz obr.2.2). Vypočtené napětí se pak ještě ověřilo v programu ANSYS® Academic Teaching Advanced 11.0. Tento program je založen na metodě konečných prvků, kdy je těleso rozděleno na konečný počet částí a k těm se pak sestavují rovnice a následně probíhá výpočet [6].

Zde je uveden výpočet smykového napětí τ na zúžené části. Za krouticí moment M_k byla dosazena známá hodnota 20000Nm. Vzorec pro průřezový modul (2.6) je uveden již v kapitole 2.2. Pro výpočet hodnoty průřezového modulu byl použit zaokrouhlený průměr $\varnothing D=98\text{mm}$.

$$\tau = \frac{M_k}{W_k} \quad (3.1)$$

$$W_k = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{16 \cdot D} = \frac{\pi \cdot (98^4 - 50^4)}{16 \cdot 98} = 172280,325 \text{ mm}^3$$

$$\tau = \frac{M_k}{W_k} = \frac{20000 \cdot 10^3}{172280,325} = 116,089 \text{ MPa}$$

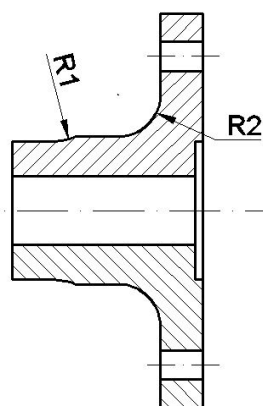
Dále následuje výpočet deformace v hlavním směru ε_1 . Tuto deformaci přepočteme zpětně dosazením hodnoty smykového napětí ze vzorce (3.1) do rovnice (2.2). Hodnota deformace tedy bude:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} (\tau + \mu \tau) = \frac{1}{200000} (116,1 + 0,3 \cdot 116,1) = 754 \cdot 10^{-6} [-]$$

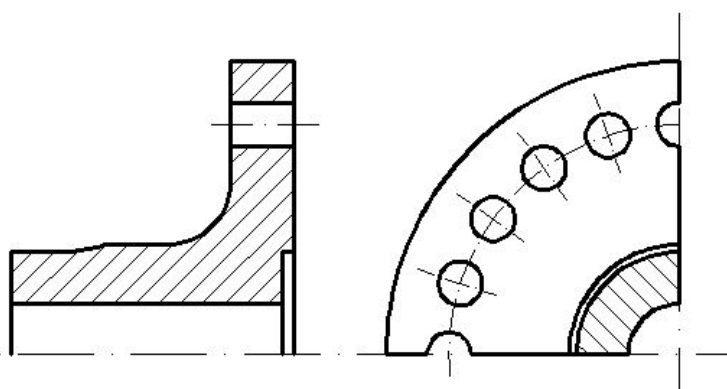
Tato hodnota se díky zaokrouhlení nepatrně liší od hodnoty, ze které bylo vycházeno při návrhu průměru snímače.

3.1 Tvorba modelu – upřesnění zaoblených přechodů

Pro rychlejší výpočet bylo možné využít symetrie modelu. Model byl tedy pomyslně říznut rovinou ve středu měřicí části (obr.3.1). Následně byla v programu ANSYS® vytvořena jedna čtvrtina z této poloviny modelu. To bylo provedeno z důvodu pozdějšího síťování modelu (obr.3.2).



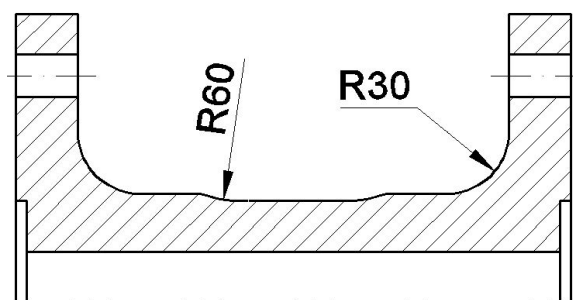
Obr.3.1 – Poloviční model snímače



Obr 3.2 – Čtvrtina modelu

Při tvorbě modelu bylo nutné vymodelovat přechody mezi jednotlivými průměry. Poloměry těchto přechodů byly pro každý výpočet upraveny z důvodu koncentrace napětí na těchto přechodech. Tento proces byl proveden v několika krocích s jednoduchou sítí na polovičním modelu vymodelovaného dle obrázku (obr.3.1) s počátečními poloměry $R_1=10\text{mm}$ a $R_2=30\text{mm}$. Poloměr R_2 u přechodu na přírubu byl ponechán. Tento model neobsahoval díry pro šrouby a zahloubení v přírubě. Jediná společná věc s pozdějším hlavním výpočtem byla volba materiálu a elementu. Jednalo se jen o jednoduchý výpočet mající za úkol upřesnit rozměry. Výsledkem jsou tedy dva poloměry zaoblení, které nezpůsobují velkou napěťovou koncentraci. Jako poloměr mezi měřicím místem a rovnou částí snímače byl nakonec použit poloměr $R_1=60\text{mm}$. Tento poloměr vyplynul z jednoduchého výpočtu.

Tyto poloměry pak byly použity při tvorbě nového modelu s otvory pro šrouby a zahloubením v přírubě. Na obrázku (obr.3.3) jsou pak vidět poloměry použité pro výpočet.



Obr.3.3 – Zvolené poloměry přechodů

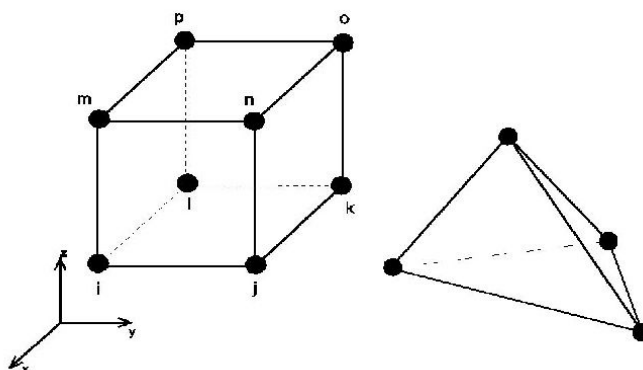
3.2 Příprava modelu v programu ANSYS

Po úpravách poloměrů byl následně vytvořen čtvrtinový model snímače se všemi podstatnými otvory a zahlboleními.

3.2.1 Výběr elementu a materiálu modelu

Z materiálových modelů byl v programu vybrán konstrukční, elastický izotropní materiál s modulem pružnosti v tahu $E=200\text{GPa}$ a Poissonovým číslem $\mu=0,3$. Tyto hodnoty jsou charakteristické pro ocel s označením ČSN 14 260.8.

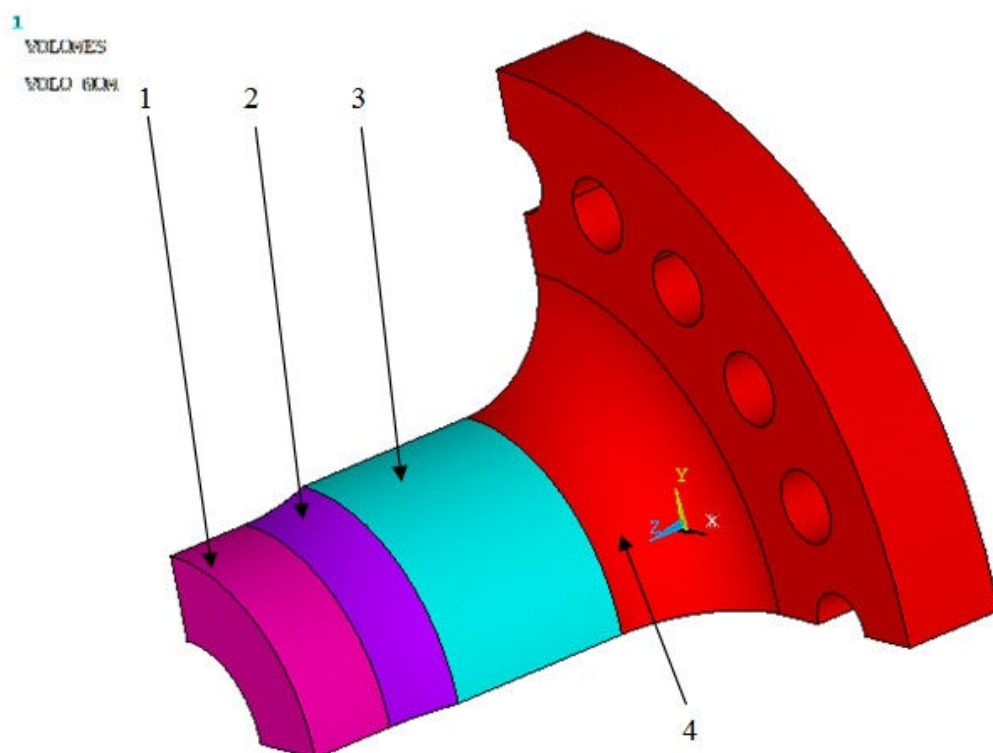
Jako element, což je nejmenší část, z níž je model vytvořen, byl použit prvek s označením SOLID185. Jedná se o prvek tvořený osmi uzly, pomocí kterého se tvoří prostorové modely. Každý uzel tohoto prvku (elementu) má tři stupně volnosti. Jedná se o posuvy v osách x , y a z . Tento prvek je primárně používán jako šestistěn („brick“-cihla), ale umožňuje tvorbu čtyřstěnů (tetraedrů) tam, kde nelze tvar modelu docílit pomocí šestistěnů. Na obrázku (obr.3.4) je zobrazen prvek SOLID185 [7].



Obr.3.4 – Element SOLID185

3.2.2 Rozdělení modelu na samostatné objemy

Importovaný model z prostředí ANSYS Workbench do ANSYSu bylo nutné rozdělit na jednotlivé objemy z důvodu pozdějšího použití síťovací metody „sweep“. Model byl rozdělen na čtyři samostatné objemy pomocí řezů rovinami (obr.3.5).



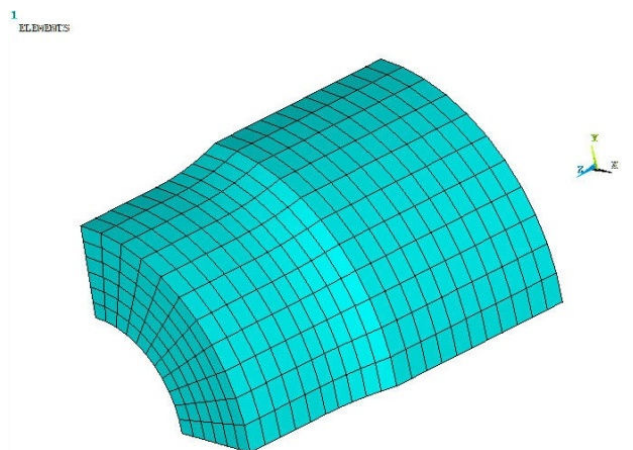
Obr.3.5 – Rozdělený model na jednotlivé objemy

Objemy na obrázku (obr.3.5) jsou pro názornost barevně odlišeny.

3.3 Síťování modelu

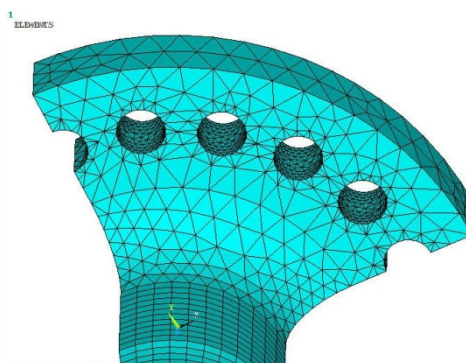
Rozdělená čtvrtina modelu byla vysítována pomocí zvoleného prvku a vhodné metody. Jako vhodná metoda pro síťování měřicí části a válcových objemů bez otvorů byla zvolena metoda „sweep“, jejíž výsledek je vidět na následujícím obrázku (obr.3.6). při této metodě byly vytvořeny skoro pravidelné šestistěny.

Velikost elementu při této metodě byla zvolena při prvním výpočtu 10mm. Tato velikost elementu byla v dalším výpočtu zmenšena na 5mm. S touto velikostí se výsledky od předchozího výpočtu lišily nepatrně.



Obr.3.6 – Síť vytvořená metodou SWEEP

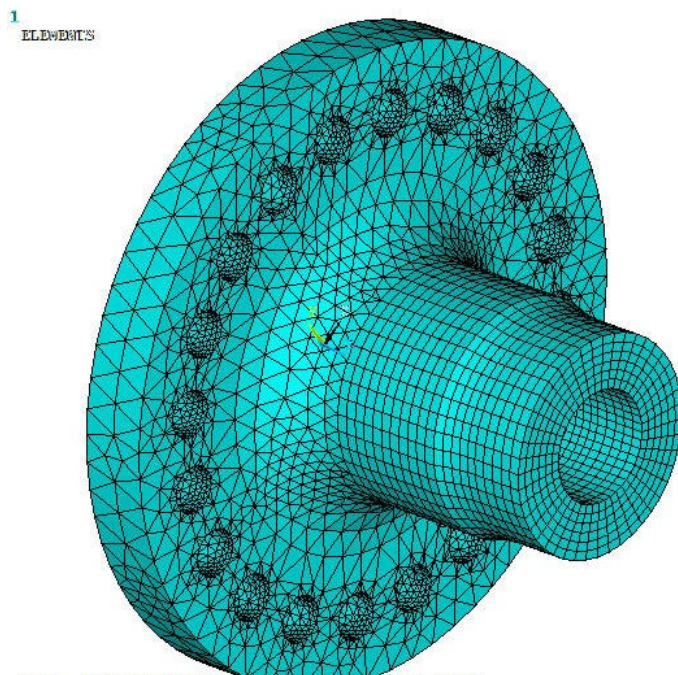
Pro vysítování zaobleného přechodu a příruby s otvory pro šrouby byla použita metoda síťování s použitím čtyřstěnných elementů za pomoci funkce Smart Size (chytrá velikost). Pomocí této metody byla vygenerována podstatně hrubší síť. U příruby nebylo nutné dělat síť jemnější proto, že největší napětí vznikne na měřicí části snímače (nejužším průměru) popřípadě na poloměru přechodu. Síť příruby je patrna na dalším obrázku (obr.3.7).



Obr.3.7 – Vysítovaná příruba

Na obrázku (obr.3.7) je vidět, že při funkci Smart Size byly použity menší elementy hlavně kolem otvorů, aby přesněji vymodelovaly zaoblení. Větší elementy byly pak použity na rovných plochách a při tvorbě většího poloměru přechodu.

Takto vysítovaná čtvrtina modelu byla pak následně kopírována a byla doplněna na celý model (obr.3.8). Všechny čtyři části mají naprosto shodnou síť. Jednotlivé čtvrtiny modelu pak bylo nutné spojit dohromady (merge). Toto spojení sjednotilo uzly elementů, které při kopírování byly zdvojeny. Tuto operaci bylo nutno provést, jinak by byl model počítán jako samostatné čtvrtiny, které by se pravděpodobně od sebe při výpočtu odpojily.



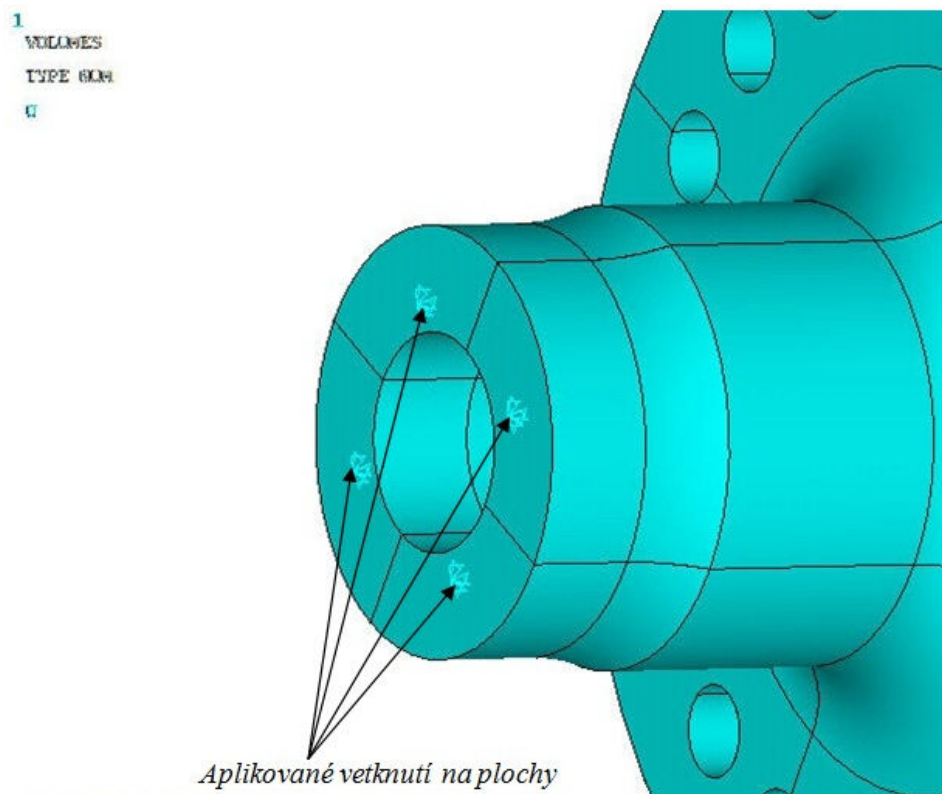
Obr.3.8 – Síť celého výpočtového modelu

3.4 Výpočet modelu v programu ANSYS

Celý vysíťovaný model byl propočítán programem ANSYS. Tento výpočet spočívá v sestavení rovnic. Každý uzel má tři možné posuvy, tudíž celkový počet rovnic bude trojnásobek počtu uzlů. Z těchto rovnic se vypočítají posuvy v jednotlivých uzlech, které jsou následně přepočteny na napětí.

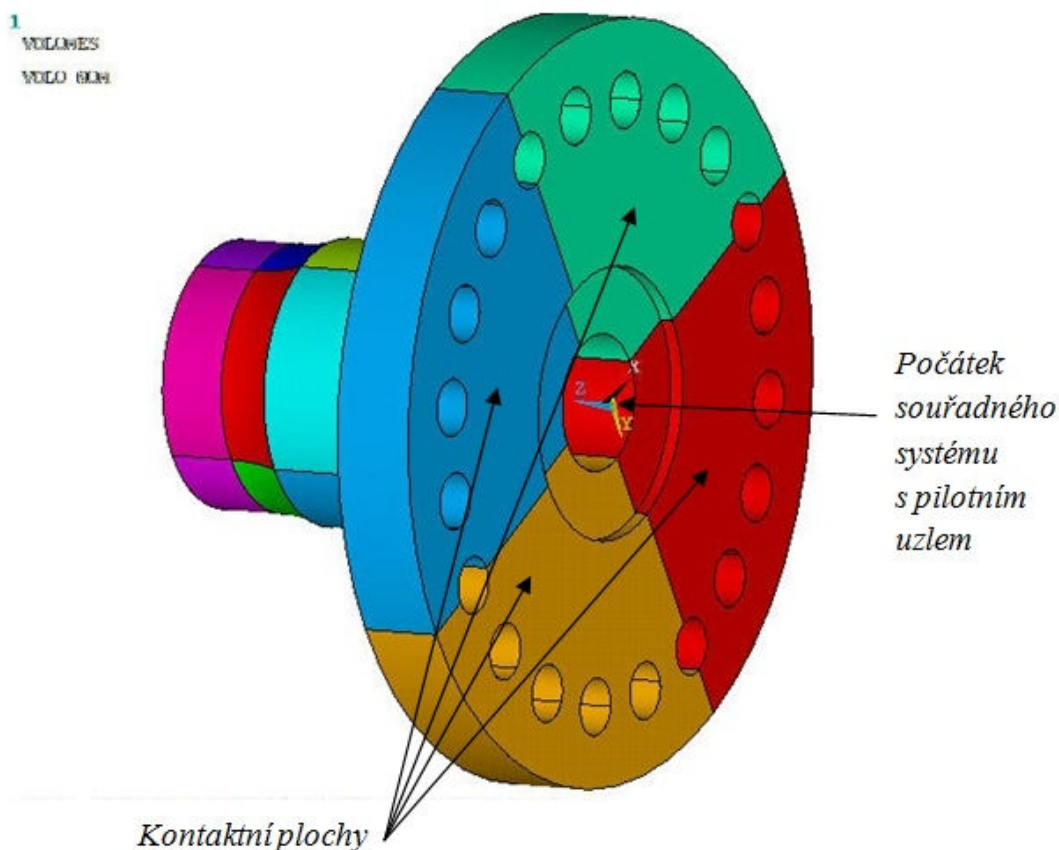
3.4.1 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky obsahují uložení modelu součástí (vazby) a aplikovaná zatížení modelu (síly, momenty, tlak atd.). Jako první okrajová podmínka bylo použito vetknutí (zamezení pohybu ve všech osách). Toto vetknutí bylo aplikováno na plochy, kde byl model říznut z důvodu symetrie (obr.3.9). Z těchto ploch pak bylo vetknutí před výpočtem automaticky převedeno na každý uzel tvořící tyto plochy.



Obr.3.9 – Vetknutí na plochách

Další okrajová podmínka je zavedení krouticího momentu M_k . S touto okrajovou podmínkou souvisí tvorba kontaktní dvojice. Moment lze zadat i jako silovou dvojici aplikovanou v příslušných uzlech, ale ve výsledcích pak vznikají lokální špičky v uzlech od těchto sil. Z tohoto důvodu byla modelována kontaktní dvojice. Tento kontakt je tvořen pilotním uzlem, který byl umístěn v počátku souřadného systému a plochami tvořícími část příruby, které přenášejí krouticí moment (obr.3.10).



Obr.3.10 – Kontaktní plochy a samostatný uzel v počátku souřadného systému

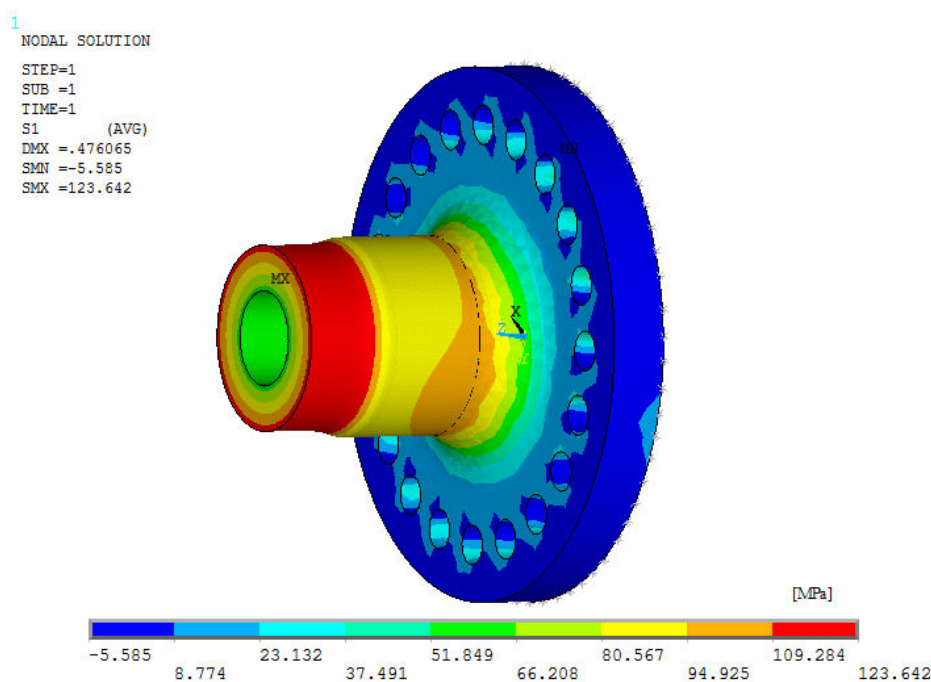
Moment byl pak zadán na pilotní uzel. Vektor momentu bylo nutné umístit správně, a to do osy z. Model je orientovaný tak, že plocha příruby je tvořena v rovině x-y. Krouticí moment tedy bude kroutit snímač kolem osy z a bude přenášen pomocí kontaktu přes celou plochu dotyku přírub. Tím docílíme toho, že se nebudou tvořit špičky napětí od síly, nebo silové dvojice, které by bylo nutno zavést v uzlech na obvodu příruby. Hodnota momentu byla zadána v Nmm (model snímače byl vytvořen v milimetrech).

3.4.2 Výpočet zatíženého modelu

Po aplikaci všech okrajových podmínek byl zahájen výpočet. Celý model se skládá z 52405 elementů (čtyřstěnů i šestistěnů) a 18124 uzlů.

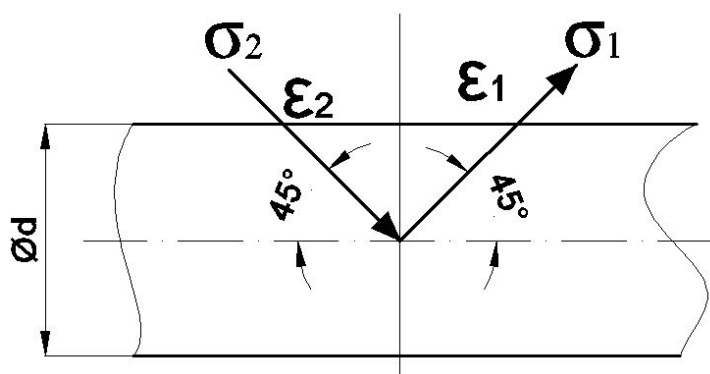
Získané výsledky napěťově-deformační analýzy budou uvedeny v následující části.

Prvním výsledkem celého výpočtu je zobrazeno první hlavní napětí, které je totožné s napětím smykovým. Na obrázku (obr.3.11) je vidět průběh hlavního napětí v celém modelu snímače. Obrázek je doplněn legendou přiřazující jednotlivým rozsahům napětí příslušnou barvu. Z obrázku je patrná maximální hodnota napětí, které se nachází v červené oblasti. Toto maximum se nachází na poloměru přechodu z měřicí části a je rovna 123,642MPa.



Obr.3.11 – Průběh prvního hlavního napětí

Druhé hlavní napětí je stejně velké jako první jen je záporné. Směry hlavních napětí a deformaci jsou zobrazeny na obrázku níže (obr.3.12) [8].

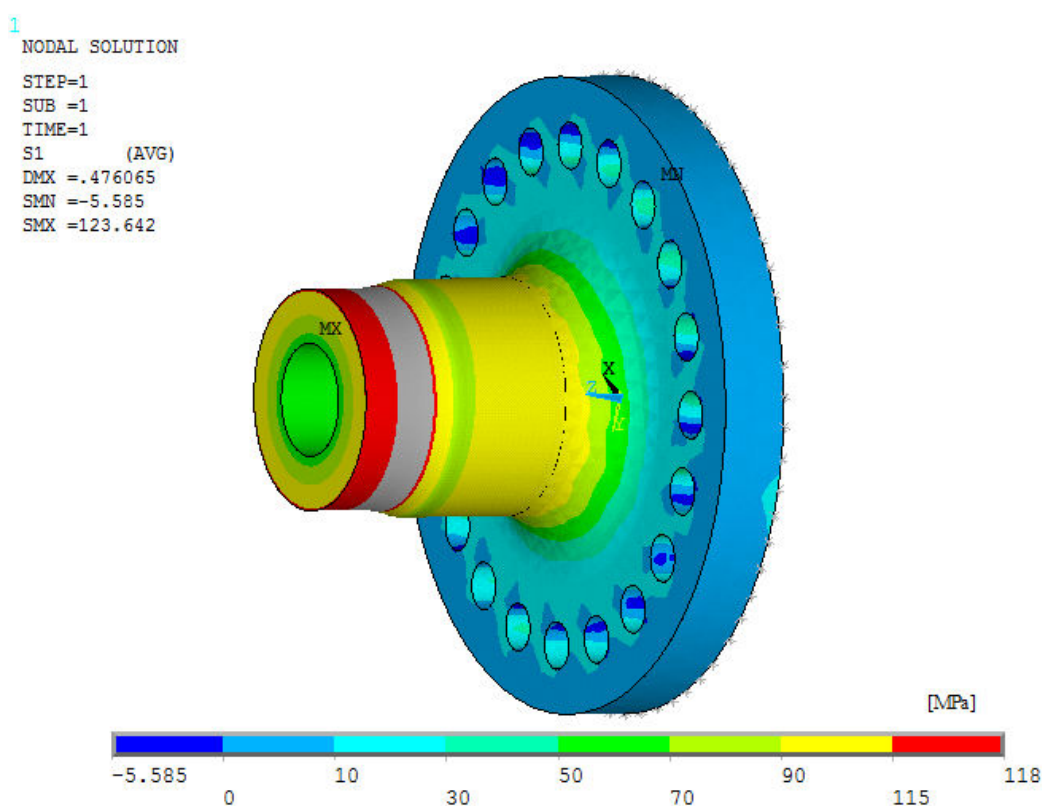


Obr.3.12 – Směry hlavních napětí a deformací při krutu

Na dalším obrázku (obr.3.13) jsou zobrazeny také výsledky hlavního napětí. Výsledky zobrazené na tomto obrázku byly upraveny následujícím způsobem.

Legenda přiřazující jednotlivým rozsahům napětí určitou barvu byla upravena tak, aby maximální smykové napětí bylo eliminováno a byl zobrazen jen rozsah napětí, které bylo vypočteno na začátku kapitoly 3. Proto je na obrázku 3.13 oblast šedé barvy, která by odpovídala rozsahu napětí od 118 do 123MPa.

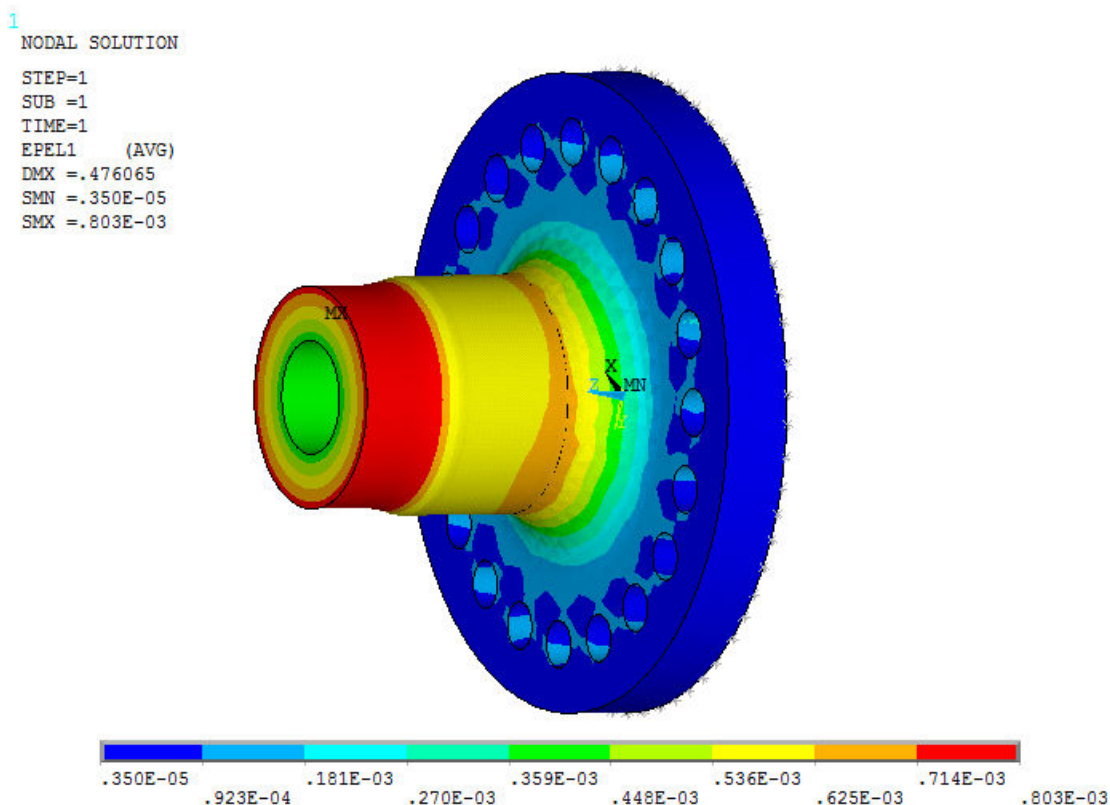
Nejdůležitější na obrázku (obr.3.13) je oblast s červenou barvou, která ukazuje oblast na povrchu měřicí části s hlavním napětím v rozpětí od 115 do 118MPa.



Obr.3.13 – Zobrazení smykového napětí na měřicí části

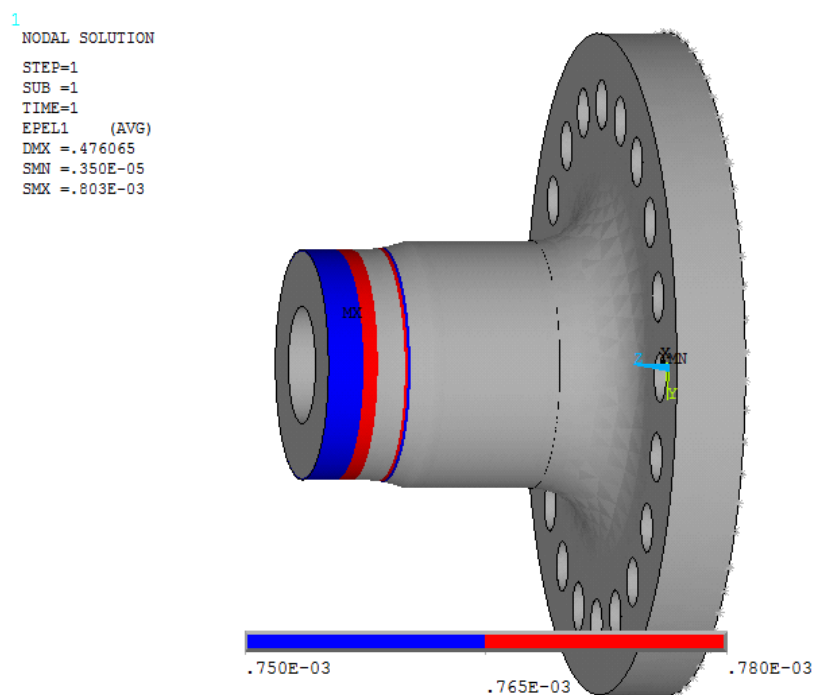
Dále je zobrazena celková deformace snímače. Hodnota deformace, ze které vycházel návrh zúženého průměru byla 750×10^{-6} . Její hodnota na měřicím místě po dosazení zaokrouhleného průměru ($\varnothing D=98\text{mm}$) je dle vzorce z kapitoly 2 (2.2) $\varepsilon_1=754 \times 10^{-6}$. Rozdíl mezi nimi je zanedbatelný.

Z obrázku (obr.3.14) je patrné, že na měřicím povrchu snímače při výpočtu pomocí programu ANSYS je první hlavní deformace na měřicí části snímače ε_1 v rozmezí od 714×10^{-6} do 803×10^{-6} . Po úpravě barevné škály na rozmezí $750 \div 780 \times 10^{-6}$ bylo vidět deformace na měřicí části, které by odpovídaly vypočteným hodnotám ($750-754 \times 10^{-6}$). Pak byl vytvořen obrázek (obr.3.15).



Obr.3.14 – První hlavní deformace

Druhá hlavní deformace je stejně velká, ale záporná. Směry hlavních napětí a deformací jsou na obrázku 3.12. Šedá plocha zobrazuje místa, kde se nenachází hledané hodnoty (hledané hodnoty se nachází na zúžené měřicí části snímače).



Obr.3.15 – Upravené rozmezí deformací

Tyto výsledky jsou téměř shodné s výsledky vypočtenými exaktně pomocí dostupných vzorců uvedených v kapitole 3. Výpočet snímače lze tedy považovat za korektní.

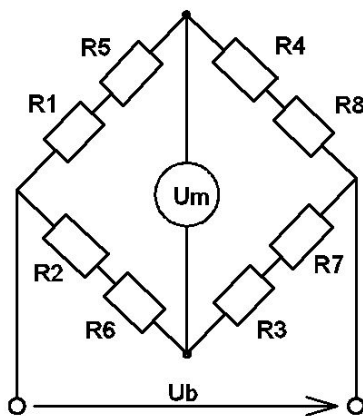
4 Schéma zapojení a návrh měřicí aparatury

Snímač krouticího momentu bude připojen k měřicí aparatuře, která bude zobrazovat měřenou veličinu (v tomto případě krouticí moment). Měřenou veličinou je v tomto případě elektrické napětí, které je následně touto aparaturou převedeno na příslušnou hodnotu krouticího momentu.

4.1 Použité tenzometry

Tenzometry jsou důležitou součástí snímače. Bez těchto členů by nebylo možno měřit příslušnou veličinu. Tento snímač bude osazen elektrickými odporovými tenzometry ve formě kovové fólie, která se následně lepí na povrch snímače (na zúženém místě snímače). Fóliové tenzometry se vyrábějí fotochemicky a jejich tloušťka se pohybuje od 5 do 15 μm. Použitý typ fóliového tenzometru bude tzv. „tenzometrický šíp“. Pomocí těchto šípů se měří smyková napětí a krouticí momenty. Tyto tenzometry se zapojují do tzv. Whetstonova můstku (obr.4.1) [8,9]. Každý tenzometr má tzv. k-faktor (deformační součinitel), který vystupuje v rovnici pro deformaci v závislosti na změně odporu (4.1) [9].

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (4.1)$$



Obr.4.1 – Wheatstonův můstek

Tento k-faktor se určuje experimentálně na kalibračních zařízeních. Pro většinu odporových tenzometrů má k-faktor hodnotu přibližně $k=2$. Tyto snímače jsou vyrobeny z materiálů, pro které je toto číslo konstantní pro široký rozsah deformací.

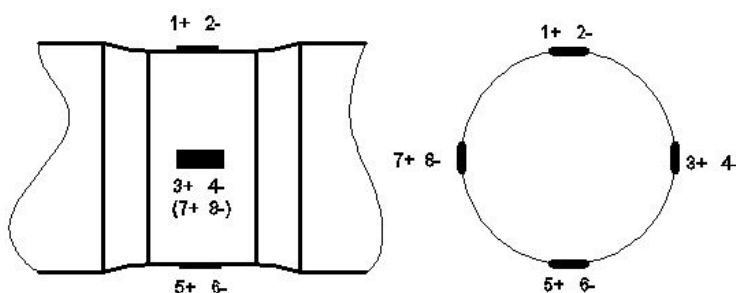
Použité tenzometry mohou být například od firmy VISHAY. V tomto případě bude použit typ tenzometru N2A-XX-T031P-350 s hodnotou elektrického odporu $350\Omega \pm 0.2\%$ pro duální mřížku.

Celý most zapojený dle obr.4.1 by pak měl celkový odpor 700Ω . Rozměry jedné mřížky jsou $5,8 \times 7,1 \text{ mm}$. Na obrázku (obr.4.2) je zobrazen výše zmíněný tenzometr.



Obr.4.2 – Tenzometrický šíp N2A-XX-T031P-350

Rozmístění těchto tenzometrů po obvodu snímače je na obrázku níže (obr.4.3). Těchto tenzometrů, jelikož jsou to duální mřížky pro měření smykové deformace a potažmo krouticích momentů, je dohromady osm, ale zapojují se do dvojic dle obr.4.1. Volbou tohoto zapojení dochází ke kompenzaci teploty a dalších nežádoucích zatížení jako je ohyb a osová síla. Tenzometry budou přilepeny lepidlem Epoxylite 813 dodávaným výrobcem [10]. Po zapojení budou snímače přelakovány krycím lakem jako ochrana proti poškození, zkratu a vlhkosti.



Obr.4.3

4.1.1 Princip měření odporovými tenzometry

Obecně při zapojení tenzometrů do můstku mohou být některé tenzometry deformovány a některé ne. Tenzometry, které se při zatížení deformují, jsou tenzometry aktivní. Dále jsou pak v můstku zapojeny tenzometry kompenzační, které se lepí poblíž aktivních tenzometrů. Pro měření změn odporovými tenzometry existují dvě metody [9].

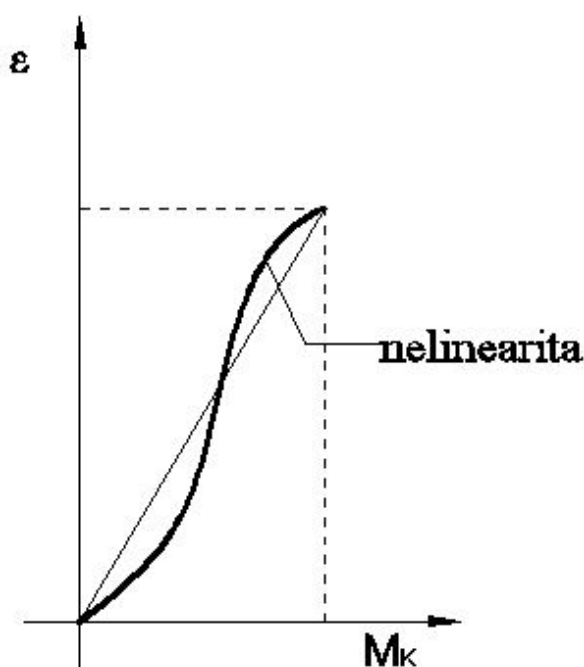
- Nulová metoda

- Výhylková metoda

Při nulové metodě jsou v můstku zapojeny například dva aktivní tenzometry, které jsou nalepeny na měřené součásti a další dva jsou umístěny přímo v měřicí aparatuře. Tenzometry umístěné v aparatuře mají proměnný elektrický odpor, který lze ručně nastavit. Takový můstek je nutné před i po zatížení vyvážit pomocí těchto nastavitelných odporů. To zabere nějaký čas, tudíž se tato metoda používá při statických měřeních.

Výhylková metoda měří změnu odporu aktivního tenzometru přímo a to tak, že se změnou odporu některého tenzometru se můstek stane nevyváženým a měřicí úhlopříčkou se zapojeným ampérmetrem (voltmetrem) začne protékat proud. Tato změna se zobrazí okamžitě, proto je tato metoda vhodná jak pro statické tak i dynamické zatěžování [9].

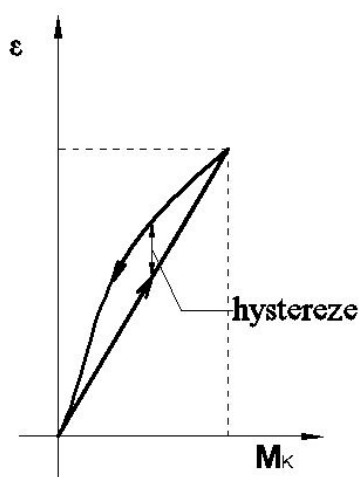
Měření odporovými tenzometry mohou být ovlivněna vnějšími vlivy jako např. teplotou, vlhkostí nebo tlakem. Další důležitou vlastností tenzometrů je linearita výsledků. Z Hookeova zákona $\sigma = E \cdot \epsilon$ [3] musí být deformace přímo úměrná zatížení pohybujeme-li se v oblasti pružných deformací. Tato linearita je ovlivněna odchylkou od ideálního stavu, kdy jsou výsledky měření na přímce (obr.4.4). Tato odchylka je udávána v procentech.



Obr.4.4 – Nelineární průběh měření

Odchylky od linearity u snímačů dostupných na trhu se pohybují v setinách až desetínách procent, což není nějak velká hodnota. Nelinearita navrhovaného snímače by musela být zjištěna měřením – kalibrací snímače. Tento problém se dá omezit pomocí vhodné měřicí aparatury.

Další vlastnost tenzometrů je hystereze. Ta se projevuje při střídavém zatížení, kdy při zatěžovacím a odlehčovacím cyklu je naměřená veličina při stejné zátěži rozdílná. Toto je zobrazeno na obr.4.5. Hystereze se udává také v procentech výstupního signálu.



Obr.4.5 –Hystereze tenzometrů

4.2 Měřicí aparatura

Napájení a měření výstupního napětí z můstku se provádí pomocí měřicí aparatury. Tyto aparatury napájí můstek, měří změnu napětí a výstupní signál z můstku převádějí na měřenou veličinu. V tomhle případě bude aparatura zobrazovat přímo krouticí moment M_k .

Pro měření krouticího momentu byla vybrána aparatura firmy Orbit Merret [11]. Jedná se o typ OM502T vhodný pro měření tenzometrických můstků (obr.4.6).

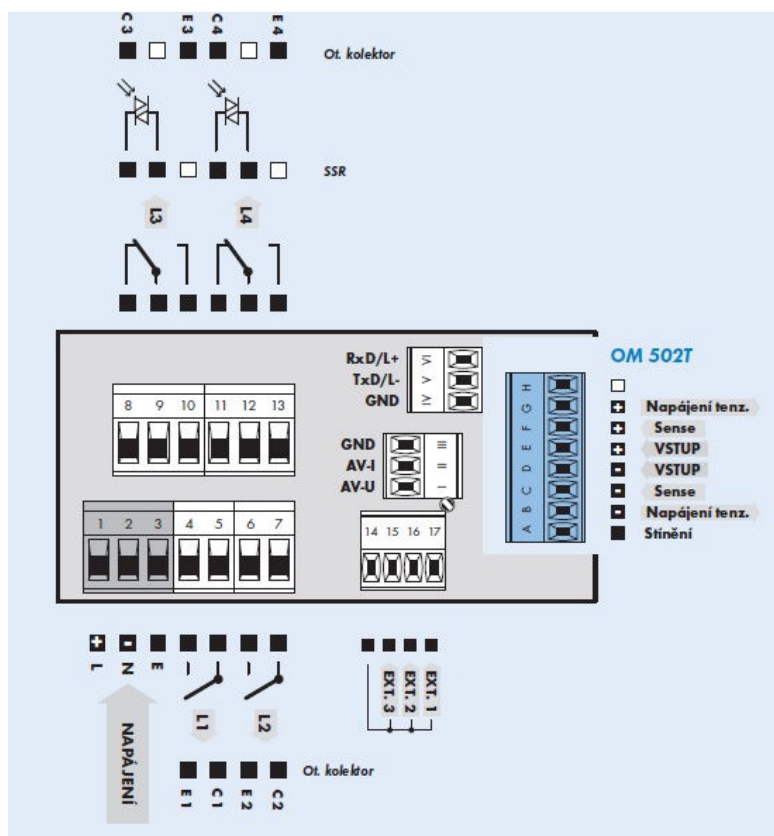


Obr.4.6 – Aparatura OM502T

Přístroj OM502T je precizní, stabilní přístroj s pětimístným zobrazovacím displejem. Možnosti zobrazení hodnot na displeji je tedy od -99999 do 99999. Přístroj disponuje datovými a analogovými výstupy. Naměřené hodnoty je možno ukládat do vestavěné paměti. Pro ukládání dat jsou u tohoto přístroje dva režimy. Při tom nejúspěšnějším ukládání dat je možno uložit 266000 hodnot. Tato data lze přenést do PC přes příslušné konektory. Zařízení je vybavené také tárou (vynulování displeje při nenulovém vstupním signálu).

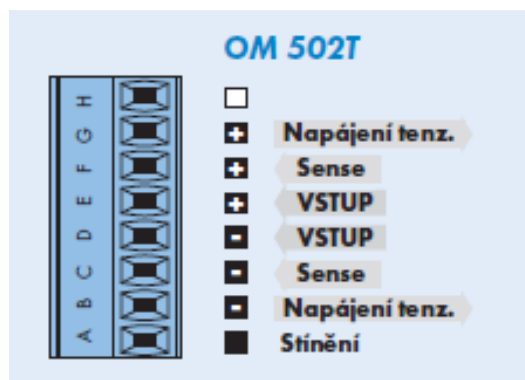
Napájení přístroje je od 80 do 230V stejnosměrných nebo střídavých. Přesnost přístroje je 0,05% rozsahu. Rychlost snímání je od 1 do 100 měření za sekundu. Citlivost lze nastavit od 1 do 4mV/V (použita bude citlivost 1,5mV/V).

Zadní panel přístroje se všemi vstupy a výstupy je na obrázku (obr.4.7). Obrázek je z technické dokumentace poskytované výrobcem [11].



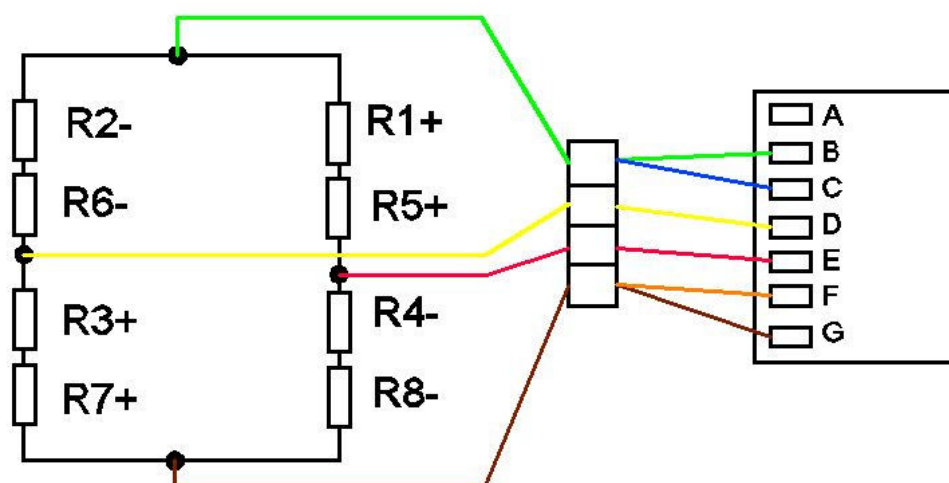
Obr.4.7 – Zadní panel přístroje OM502T

Důležitá je na obrázku 4.7 část s vstupy a výstupy pro zapojení mostu. Tento panel je na dalším obrázku (obr.4.8).



Obr.4.8 – Panel pro tenzometrický můstek

Zapojení tenzometrů bude provedeno právě do tohoto panelu (obr.4.7). Vstupy B a G jsou k napájení můstku. Vstupy C a F jsou pro kompenzaci úbytku napětí po délce vodičů k napájení můstku. Vstupy D a E jsou vstupy z měřící úhlopříčky můstku. Zapojení můstku a aparatury bude provedeno dle následujícího schématu (obr.4.9). Barevné rozlišení vodičů je voleno čistě náhodně a je jen pro přehlednost schématu.



Obr.4.9 – Schéma zapojení tenzometrů

Vstup A je pro případné stínění. Ostatní zdířky (B-G) odpovídají schématu zadního panelu. Znaménka u tenzometrů značí směr měřené deformace.

5 Závěr

V této práci byl navrhnut snímač krouticího momentu pro utahování matic. Při navrhování průměru měřicí části se vycházelo z dostupných vzorců. Výsledný průměr snímače byl následně použit pro napětově-deformační analýzu v programu ANSYS®. Výsledky analýzy potvrdily správnost výpočtu průměru snímače. Navíc byly pomocí tohoto programu upraveny poloměry přechodů. Vypočtené smykové napětí je 116MPa. Deformace vyvolaná krouticím momentem v jedno hlavní směru na navrženém průměru je $\varepsilon_1 = 754\mu S$. Oproti hodnotě, která byla použita pro návrhový výpočet se liší o 0,53%. Tento rozdíl se odstraní přidáním odporem.

Následoval návrh a výpočet upevnění snímače. Krouticí moment bude na snímač přenášen třením přírub. Byla vypočtena síla, kterou budou příruby k sobě tlačeny. Tato síla byla navíc z důvodu proti proklouznutí ještě zvýšena o 20%. Přišroubování snímače je provedeno pomocí dvaceti vysokopevnostních šroubů. Pro tyto šrouby byl vypočten utahovací moment. Utahovací moment šroubů je 277,823Nm.

Pro tento snímač byl navržen měřicí obvod s vhodnými tenzometry. Dále byla navrhována aparatura, která bude zpracovávat měřená data. Použité tenzometry jsou tedy od firmy VISHAY. Navrhovaná aparatura je typ OM502T od firmy MERRET.

Seznam použité literatury

- [1] FÜRBAACHER a kolektiv: Lexikon technických materiálů, Verlag Dashöfer, Praha, 2001
- [2] LEINVEBER,J., VÁVRA,P.: Strojnické tabulky-třetí doplněné vydání, ALBRA, Úvaly, 2006, ISBN 80-7361-033-7
- [3] LENERT,J.: Pružnost a pevnost I, [Skriptum], FS VŠB-TU Ostrava, 2005, ISBN 80-248-0113-2
- [4] NĚMCEK,M.: Řešené příklady z částí a mechanismů strojů-Spoje, [Skriptum], FS VŠB-TU Ostrava, 2002, ISBN 80-248-0050-0
- [5] KALÁB,K.: Části a mechanismy strojů pro bakaláře - Části spojovací, [Skriptum], VŠB-TU Ostrava, 2008, ISBN 978-80-248-1290-8
- [6] LENERT,J.: Úvod do metody konečných prvků, [Skriptum], FS VŠB-TU Ostrava, 1999, 2008, ISBN 80-7078-686-8
- [7] ANSYS INC.: Documentation for ANSYS Release 11.0.SAS IP, Inc., 2007
- [8] MACURA,P.: Sběrka úloh z experimentální pružnosti, [Skriptum], FS VŠB-TU Ostrava, 2008, ISBN 978-80-248-1823-8
- [9] MACURA,P.: Experimentální metody v pružnosti a plasticitě, [Skriptum], FS VŠB-TU Ostrava, 2008, ISBN 978-80-248-1860-3
- [10] VISHAY, www.vishay.com
- [11] ORBIT MERRET, www.merret.cz

Seznam příloh

Výkresová dokumentace:

SB3APM02-VIG001-01 – Výrobní výkres snímače (formát A2)

SB3APM02-VIG001-02 – Výkres sestavy (formát A2)